

STİBİUM-SULFİD SİSTEMLƏRİNİN ELEKTROKİMYƏVİ YOLLA SİNTEZİNƏ BİR SIRA AMİLLƏRİN TƏSİRİNİN ÖYRƏNİLMƏSİ

Pərvin QULİYEV¹ , Rəvanə ƏSGƏRLİ¹ 

¹Naxçıvan Dövlət Universiteti, Naxçıvan, Azərbaycan

*Yazışılan müəllif: pervinquliyev@ndu.edu.az

NƏŞR TARİXİ:

Qəbul edilmə tarixi:
27.08.2026

Nəşr edilmə tarixi:
28.09.2026

AÇAR SÖZLƏR:

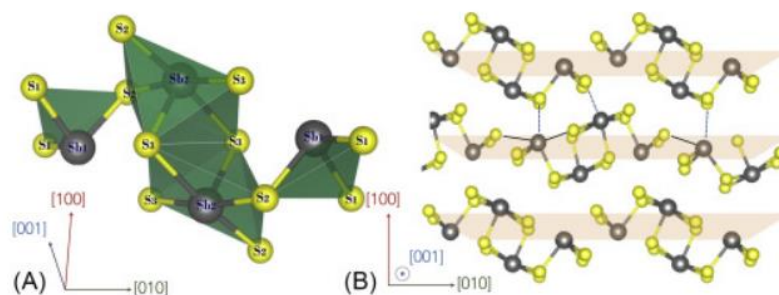
stibium-sulfid,
elektrokimyəvi
çökmə, yarımkeçirici
təbəqələr, qadağan
olunmuş zona,
elektrolit

XÜLASƏ

Təqdim olunan tədqiqat işi yarımkeçirici texnologiyasında mühüm yer tutan stibium-sulfid (Sb_2S_3) nazik təbəqələrinin elektrokimyəvi çökmə metodu ilə sintezinə həsr olunmuşdur. Tədqiqat zamanı əsas obyekt kimi stibium (III)-xlorid (SbCl_3) və natrium-sulfit (Na_2SO_3) əsaslı elektrolitlər seçilmişdir. Bu elektrolitlərdən istifadə etməklə metallik stibium və sulfidli fazaların ayrılma qanunauyğunluqları müəyyən edilmişdir. Təcrübi proseslərdə limon turşusunun kompleksmələğətirici agent kimi rolu, tətbiq olunan gərginliyin (1,5 V və 9 V) çökmə kinetikasına təsiri və elektrod materialı kimi misin (Cu) reduksiya prosesində davranışı geniş analiz edilmişdir. Təcrübə zamanı katodda yaranan stibium təbəqəsinin elektrik müqavimətinin zamanla artması və bunun cərəyan şiddətinə təsiri elmi cəhətdən əsaslandırılmışdır. Təcrübələr nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, katodda formalaşan stibium-sulfid təbəqəsinin qalınlığı artdıqca sistemin elektrik müqaviməti eksponensial şəkildə yüksəlir və bu, cərəyan şiddətinin zamanla sıfıra düşməsinə səbəb olur. Gərginliyin 1,5 V-dan 9 V-a qaldırılması çökmə sürətini artırsa da, yüksək gərginliklərdə müşahidə olunan intensiv hidrogen ayrılması təbəqənin morfoloji bircinsliliyini və elektrod səthində adgeziya qabiliyyətini pisləşdirir. Anod proseslərinin analizi göstərir ki, mis elektrodun oksidləşməsi və məhlulda rəngli komplekslərin yaranması yarımkeçirici sintezi zamanı elektrod materialının seçilməsinin həlledici olduğunu sübut edir.

GİRİŞ

Stibium sulfid (Sb_2S_3 , stibnit) ortorombik kristal quruluşa malik yarımkeçirici materialdır. Elektron və optoelektron cihazlarda görkəmli xüsusiyyətlərə və potensial tətbiqlərə malik materiallardandır. Sb_2S_3 -ün cəlbədicə xüsusiyyətlərindən biri kristal quruluşda olmasıdır ki, o, (010) və (100) kristallaşma istiqamətində Van-der-Vaals qüvvələri ilə birləşdirilmiş ikiqat, Sb_4S_6 dimer strukturlarda n tip keçiriciliyə malik lentvari strukturlardan ibarət olur. Güclü kovalent stibium-sulfid rabitələri isə vahidləri (001) istiqamətində bir yerdə saxlayır (Şəkil 1) (Majidzade V.A. et. al 2019). Bundan əlavə, nəzəri hesablamalar və təcrübi nəticələr göstərir ki, (001) istiqamətində daşıyıcıların daşınması digər istiqamətlərdəkindən daha asandır. İstiqamətdən asılı rabitə təbiəti, günəş enerjisi spektrinin görünən və İQ bölgəsinin maksimum spektrini əhatə edən sm^{-1} udma əmsalı ilə fiziki xüsusiyyətlərdə əhəmiyyətli bir dəyişikliyə səbəb olur (Majidzade V.A. et. al 2017). Sb_2S_3 nanohissəciklərinin qadağan olunmuş zolağının eni 1,78-2,5 eV aralığında dəyişir. Müasir bərk cisimlər kimyası və elektronika sahəsində stibiumun sulfidli sistemləri (Sb-S) özünəməxsus kristal quruluşuna və qadağan olunmuş zonanın genişliyinə görə strateji əhəmiyyətli yarımkeçiricilər qrupuna daxildir. Yarımkeçirici nazik təbəqələrin elektrolitik yolla sintezi zamanı elektrod-məhlul sərhədində baş verən mürəkkəb fiziki-kimyəvi proseslərin öyrənilməsi mikrokristallıq qurğuların effektivliyinin artırılması üçün zəruridir. Bu cür sistemlərin elektrokimyəvi davranışını analiz edərkən, potensialın paylanması və yükdaşıyıcıların kinetikasi həm klassik elektrokimyanın, həm də yarımkeçiricilər kimyasının qanunauyğunluqları ilə idarə olunur (VA Majidzade et al. 2020). Xüsusilə, kompleksmələğətirici mühitdə ionların hərəkətliliyi və katod səthində kristallaşma mərkəzlərinin yaranması təbəqənin bircinsliliyini təmin edən fundamental faktorlardır.



Şəkil 1. Stibium sulfid monomer və dimerlərinin kristallaşma istiqamətinin xarakteristikası

Stibium sulfid Sb_2S_3 , optoelektron cihazlarında, mikrodalğalı cihazlarda və fotoqalvanik strukturlarda potensial tətbiqləri üçün geniş araşdırılan vacib V–VI qrup elementlərinin yaratdığı $A_2^VB_3^VI$ kimi stexiometrik struktura malik yarımkeçirici materialdır (Ganesh Sh. H. et. al. 2022). Təbiətdə ortorombik kristal quruluşa malik mineral stibnit kimi rast gəlinir. Yüksək refraktiv indeks, yaxşı müəyyən edilmiş kvant ölçüsü effekti, fotosensitivlik və termoelektrik xüsusiyyətləri kimi özünəməxsus xassələri bu materialı yuxarıda qeyd olunan tətbiqlər üçün uyğun edir. Bu materialın günəş batareyası strukturlarında tətbiqi onun optik xüsusiyyətləri ilə əlaqələndirilə bilər. Kristal Sb_2S_3 nazik təbəqələri üçün bildirilən optiki qadağan olunmuş zolaq enerjisi $\sim 10^4 - 10^5 \text{ sm}^{-1}$ yüksək udma əmsalı ilə 1,6–1,8 eV uyğun diapazondadır (A. Parbatani et. al. 2019). Təxmini qalınlığı 1 mkm olan Sb_2S_3 nazik təbəqələri günəş radiasiyasının demək olar ki, 95%-ni udmaq qabiliyyətinə malikdir (K. Tittes et. al. 2003). Bundan əlavə, Sb_2S_3 -ün tərkib elementləri təbiətdə boldur, buna görə də bu materiala fotovoltaiik udma təbəqəsi kimi marağı əsaslandırır. Sb_2S_3 nazik təbəqələrinin hazırlanması üçün bir neçə üsul tətbiq edilmişdir: kimyəvi buxar çöküntüsü, püskürtmə pirolizi, kimyəvi vanna çöküntüsü (D.D.L. Wijngaards et. al. 2000), termal buxarlanma, elektrokimyəvi reduksiya (M. Takahashi et. al. 2004) və s. Sintez üsulundan asılı olaraq, Sb_2S_3 nazik təbəqələri üçün həm p-tipli, həm də n-tipli keçiricilik müəyyən edilmişdir. Əvvəllər qeyd olunan müxtəlif üsullar arasında elektrokimyəvi reduksiya sadəliyi və səmərəliliyi səbəbindən xeyli diqqət çəkmişdir. Çöküntü prosesində iştirak edən elektrik təbiəti təbəqələrin tərkibinə və vahidliyinə yaxşı nəzarət etməyə imkan verir. Lakin, elektrokimyəvi reduksiya vasitəsilə Sb_2S_3 nazik təbəqələrinin hazırlanması üçün yalnız bir neçə cəhd ədəbiyyatlarda verilmişdir. Dövri oksidləşmə/ həllolma və reduksiya/çökdürülmə potensialları tətbiq etməklə çökdürülmənin həyata keçirildiyi impuls elektroreduksiya bir çox yarımkeçirici materialın hazırlanmasında uğurla istifadə edilmişdir. Bu metodun üstünlüyü ondan ibarətdir ki, artıq element və zəif birləşmiş komponentlər və optimallaşdırılmaqla çıxarıla bilər.

Müxtəlif üsullarla hazırlanmış Sb_2S_3 nazik təbəqələri fotovoltaiik strukturlara daxil edilmişdir. Nanoməsaməli TiO_2 və üzvi dəlik daşıyıcı material üzərində kimyəvi yolla çökdürülmüş Sb_2S_3 günəş batareyaları 5,2 % səmərəlilik verdiyi məlum olmuşdur. Tədqiqatçılar $16,3 \text{ mA/sm}^2$ fotocərəyan sıxlığı və 5,7% güc çevirmə səmərəliliyi ilə Ti ilə aşqarlanmış Sb_2S_3 günəş batareyaları (5 at% Sb-yə) bildirmişlər (J. Christian, 1992). Meng və digərləri, 4,9% səmərəliliyi ilə Sb_2S_3 ilə modifikasiya edilmiş TiO_2 nanotel massivləri/ TiO_2 nanohissəcikləri ilə boya ilə həssaslaşdırılmış günəş batareyası bildirmişlər (M. Takahashi et. al. 2004). Ən yüksək səmərəlilik 7,5% olmaqla TiO_2 / Sb_2S_3 əsaslı heteroqəçid sistemi ilə əldə edilmişdir: mezoməsaməli- $TiO_2 Sb_2S_3 / Au$ kimi sistemlər.

Yuxarıda göstərilən bütün nəticələr bu materialın günəş batareyalarında udma təbəqəsi kimi potensialını göstərir. Buna görə də, bu materialın elektroreduksiya kimi iqtisadi və sürətli bir üsulla mümkün inkişafını araşdırmağa dəyər.

Bu işdə, flüorla zənginləşdirilmiş qalay oksidi ($SnO_2:F$) ilə örtülmüş şüşə substratlar üzərində elektroreduksiya metodu ilə hazırlanmış Sb_2S_3 nazik təbəqələrini tədqiq edilmişdir. Çöküntü parametrlərini optimallaşdırmaqla yaxşı yapışma, fəza vahidliyi və stexiometrik tərkibə malik polikristal nazik təbəqələr əldə edilmişdir. Rentgen difraksiyası, skanedic elektron mikroskopiyası (SEM), enerji dispersiyaedici rentgen spektroskopiyası, ötürücü elektron mikroskopiyası, rentgen fotoelektron spektroskopiyası, fotokeçiricilik ölçmələri, Raman spektroskopiyası və optik ötürücülük

spektroskopiyası kimi müxtəlif alətlərdən istifadə edilərək struktur, spektroskopik, optik və elektrik xüsusiyyətlərinin ətraflı tədqiqi aparılmışdır.

MATERIAL VƏ METODLAR

Tədqiqatın əsas məqsədi stibium-sulfid Sb-S sistemlərinin elektrolit məhlullarından elektrokimyəvi yolla ayrılması zamanı prosesin gedişatına təsir edən fundamental amilləri öyrənməkdir. Elektrokimyəvi proseslərə təsir edən əsas amillərin aşağıda verilənlərinin tədqiqi aparılmışdır.

1. Elektrolit tərkibinin və pH mühitinin sintezin məhsuldarlığına təsiri;
2. Müxtəlif gərginlik rejimlərində (alçaq və yüksək gərginlik) təbəqənin kristallaşma xüsusiyyətlərinin izlənməsi;
3. Yarımqeçirici təbəqənin elektrod səthində yaratdığı omik müqaviməti və bunun elektroliz prosesinin dayanmasına təsirinin analiz edilməsi;

Stibium (III)-xlorid duzu yüksək hidroliz qabiliyyətinə malik olduğu üçün, sulu məhlullarda qeyri-üzvi kimya qanunauyğunluqlarına əsasən davamlı kompleks ionların yaradılması tələb olunur. Bu məqsədlə tətbiq edilən limon turşusu stibium ionları ilə koordinasiya rəbitəsi yaradaraq prosesin termodinamik stabilliyini təmin edir. Elektrod kimi istifadə edilən misin səthinin hazırlanması prosesi isə metal-yarımqeçirici kontaktında omik müqavimətin minimal səviyyədə saxlanılmasına xidmət edir. Tədqiqat işi Naxçıvan Dövlət Universitetinin kimya laboratoriya bazasında icra edilmişdir. Təcrübələrdə aşağıdakı komponentlərdən istifadə olunmuşdur:

Yüksək təmizlik dərəcəsinə malik stibium trixlorid SbCl_3 , natrium sulfit Na_2SO_3 (0,1 M qatılıqlı məhlulu), həlledici və mühit tənzimləyicisi kimi limon turşusunun ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) məhlulundan istifadə edilmişdir.

Kimyəvi qanunauyğunluqlara əsasən, hidroliz qabiliyyəti yüksək olan ionlar kimi stibium ionları sulu məhlullarda yüksək hidroliz qabiliyyətinə malikdir və asanlıqla ağ rəngli stibium hidroksid çöküntüsü əmələ gətirir və alınan çöküntü parçalanaraq stibium oksixloridə çevrilir (Quliyev P. 2023). Prosesin termodinamik stabilliyini təmin etmək və çökmə reaksiyasını idarə etmək üçün limon turşusundan kompleksəmələgətirici mühit kimi istifadə edilmişdir. Bu kompleksəmələgətirici stibium ionlarının məhlulda bərabər paylanmasını və katodda daha birincisli təbəqənin formalaşmasını təmin edir.

İşçi və köməkçi elektrod olaraq yüksək təmizlikli mis (Cu) və nikel (Ni) lövhələrdən istifadə edilmişdir. Elektrodların səthindəki oksid təbəqəsini kənarlaşdırmaq məqsədilə əvvəlcə durulaşdırılmış nitrat turşusu (HNO_3) məhlulunda aşındırılmış, daha sonra distillə olunmuş su ilə yuyulmuşdur. Elektrokimyəvi prosesin səmərəliliyi və alınan təbəqənin elektrod səthinə adgeziyası (yapışma qabiliyyəti) birbaşa metalın səth enerjisindən asılıdır. Mis elektrodların nitrat turşusu (HNO_3) məhlulunda aşındırılması yalnız oksid təbəqəsini kənarlaşdırmır, həm də səthdə mikrokələ-kötürlük yaradaraq stibium-sulfid kristallarının rüseymlərinin yaranması üçün aktiv mərkəzlərin sayını artırır. Səthin təmizlənmə dərəcəsi kontakt müqavimətini minimuma endirir ki, bu da yarımqeçirici-metal keçidində yükdaşıyıcıların sərbəst hərəkətinə şərait yaradır (A. Parbatani et. al. 2019).

Proses əvvəlcə qalvanostatik, sonra isə potensiostatik aparılmışdır. Elektrokimyəvi hüceyrəyə yerləşdirilən elektrodlar bir-birinə paralel və təmas etməyəcək məsafədə bərkidilmişdir. Cərəyan mənbəyi kimi 9 V gərginlikli sabit cərəyan adapteri və ölçü cihazları (ampermetr, voltmetr) sistemə uyğun ardıcılıqla qoşulmuşdur. İki elektrodlu elektrokimyəvi hüceyrədə elektrodlararası məsafənin sabit saxlanılması (təxminən 1.5-2 sm) məhlulun daxili müqavimətinin (Ohmik itkilərin) prosesə təsirini minimuma endirmək məqsədi daşıyır. Ampermetr vasitəsilə cərəyan şiddətinin zamanla dəyişməsinin (I-t asılılığı) qeydə alınması, formalaşan stibium-sulfid təbəqəsinin yarımqeçirici xüsusiyyətlərini və onun elektrik keçiriciliyinin pisləşməsini vizual şəkildə analiz etməyə imkan verir. Prosesin gedişatı vizual və cihaz göstəriciləri əsasında 10-15 dəqiqə ərzində izlənilmişdir. Təcrübədə tətbiq olunan stasionar (sabit) potensial rejimi, elektrod-elektrolit sərhədindəki elektrik iqiqat qatının strukturunu sabit saxlamağa imkan verir. Elektroliz müddətinin (10-15 dəqiqə) seçilməsi, Faradey qanununa əsasən katodda ayrılan maddənin kütləsi ilə cərəyan şiddəti arasındakı

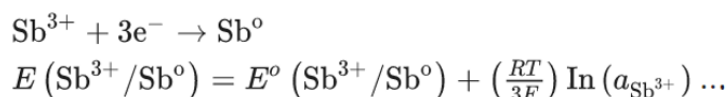
asılılığın izlənməsinin mümkünlüyüdür. Metodikaya əsasən, gərginliyin 1,5 V-dan 9 V-a qədər artırılması ionların diffuziya sürətini və elektrod potensialını dəyişərək, çökmə prosesini kinetik rejimdən diffuziya rejiminə keçirir.

NƏTİCƏLƏRİN MÜZAKİRƏSİ

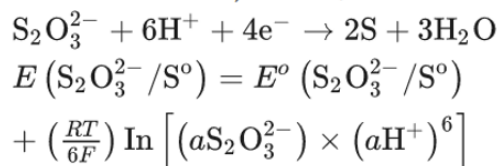
Aparılan eksperimentlər stibium-sulfid sistemlərinin sintezində bir neçə kritik məqamı üzə çıxarmışdır:

Limon turşusu mühitində Sb^{3+} ionları stabil komplekslər yaradır ki, bu da məhlulda hidroliz prosesinin qarşısını alır. 1,5 V gərginlikdə katodda yavaş sürətlə qara rəngli, bircinsli stibium təbəqəsi toplanır. Lakin gərginliyin 9 V-a qaldırılması prosesi kəskin sürətləndirir. Bu zaman katodda $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ reaksiyası üzrə intensiv qaz ayrılması baş verir. Müşahidə olunan ən maraqlı məqam fenomen cərəyan şiddətinin zamanla sifra düşməsidir. Bu çökmüş stibium-sulfid təbəqəsinin dielektrik nüfuzluğunun artması və elektrodun aktiv səthini passivləşdirməsi ilə izah edilir. Eyni zamanda bu fenomen yarımkeçirici-metal kontaktlarında baş verən yükdaşıyıcıların hərəkətinin məhdudlaşması və enerji baryerinin formalaşması ilə əlaqədardır. Təbəqə qalınlaşdıqca sistemin omik müqavimətinin eksponensial artması yarımkeçirici elektronikasında öz-özünə dayanan proses kimi xarakterizə olunur və təbəqənin qalınlığının mikron səviyyəsində idarə edilməsinə imkan verir.

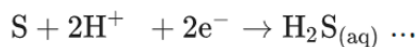
SbCl_3 və Na_2SO_3 tərkibli sulu məhlullardan flüorla zənginləşdirilmiş SnO_2 örtüklü şüşə substratları üzərində impulslarla elektroreduksiya yolu ilə stibium sulfid təbəqələri yerləşdirilmişdir. Stibiumun reduksiyası zamanı üç elektron keçidi baş verir.



Kükürdün reduksiyası zamanı isə aşağıdakı tənliklər üzrə elektron keçidi baş verə bilər.



Bu poseslərdə sulfid və ya aralıq fazada yaranan tiosulfid ionlarının reduksiyasından kükürd alınır. Adsorbsiya olunan kükürd kifayət qədər aktiv olur və hətta hidrogen sulfidə çevrilə bilər.



Prinsip etibarilə katodda Sb_2S_3 əmələ gəlməsi üçün fərdi elektrokimyəvi reaksiya addımlarının digər sulfidlər üçün bildirilən addımlara bənzər olması gözlənilir.

Tərkibində SbCl_3 və Na_2SO_3 olan sulu məhlullardan flüorla zənginləşdirilmiş SnO_2 örtüklü şüşə substratları üzərində impuls elektroreduksiya yolu ilə alınan təbəqələrin kristal quruluşu rentgen difraksiyası, Raman spektroskopiyası və SEM analizi ilə xarakterizə olunub. Çökdürülmüş təbəqələr amorf olub və 250 °C-də azot/kükürd atmosferində 30 dəqiqə tavlandıqdan sonra təbəqələr stibnit, Sb_2S_3 (JCPDS 6-0474) ilə rentgen difraksiyası nümunəsi ilə kristallaşmağa başlayıb. AFM görüntüləri göstərir ki, Sb_2S_3 təbəqələri səthdə bərabər paylanmış dənələrə malikdir və tavlama zamanı dənələrin aqlomerasiyası baş verir. Keçiricilik və əksətmə tədqiqatlarından hesablanan optik zolaq boşluğu çökdürülmüş və 300°C-də tavllanmış təbəqələr üçün müvafiq olaraq 2,2 və 1,65 eV olub kVt/m^2 volfram halogen şüalanmasında iki böyüklük dərəcəsinə malik foto-qaranlıq cərəyan nisbəti nümayiş etdirirdi.

Katodda Sb_2S_3 əmələ gəlməsi üçün fərdi elektrokimyəvi reaksiya addımlarının digər sulfidlər üçün bildirilən addımlara bənzər olması gözlənilir.

Natrium-sulfit məhlulunda aparılan təcrübədə anodda narıncı rəngli dispers fazanın yaranması müşahidə olunmuşdur. Tərəfimizdən aparılan təhlillər nəticəsində bu təbəqənin elementar kükürd və ya qeyri-stoxiometrik sulfid birləşmələri olduğu qənaətinə gəlinmişdir. Anod ətrafında yaranan yaşıl-mavi rəngli diffuziya zonası mis elektrodun anod həllolmasına məruz qaldığını və məhlulda Cu^{2+} ionlarının keçdiyini göstərir. Anodda baş verən bu korroziya prosesi və məhlulda rəngli komplekslərin yaranması yarımkeçirici təbəqələrin elektrokimyəvi sintezi zamanı elektrod materialının seçilməsinin nə dərəcədə həlledici olduğunu sübut edir. Bu ionlar məhluldakı sulfitlərlə reaksiyaya girərək rəngli komplekslər formalaşdırır. Anodun səthində yaranan narıncı rəngli təbəqə və korroziya izləri şəkil 2-də aydın şəkildə təsvir olunmuşdur.



Şəkil 2. 9 V gərginlikdə 10 dəqiqəlik elektroliz prosesindən sonra mis (Cu) katodun səthində yaranan çökiyyə və oksidləşmə izləri

Katodda stibiumun ayrılması zamanı gərginliyin 9 V-a çatdırılması prosesin kinetikasını kəskin sürətləndirsə də, yarımkeçiricilər texnologiyasının prinsiplərinə görə, yüksək sahə intensivliyi təbəqədə defektlərin yaranmasına və morfoloji qeyri-sabitliyə səbəb ola bilər (VA Majidzade et. al. 2020).

Müşahidə olunan cərəyan şiddətinin zamanla azalması (passivləşmə) fenomeni, elektrod səthində yaranan yarımkeçirici təbəqənin dielektrik xüsusiyyətlərinin artması və sistemdə potensial baryerinin formalaşması ilə əlaqədardır. Bu hadisə elektrokimyəvi sistemlərdə avtomatik tənzimlənən çökmə rejiminin yaradılmasına imkan verir. Anodda misin həllolması və sulfit ionlarının oksidləşərək elementar kükürd yaratması isə anod korroziyasının və məhlulun ion balansının dəyişməsinin tipik göstəricisidir (Ganesh Sh. H. et. al. 2022).

NƏTİCƏ

Aparılan tədqiqatlardan müəyyən edilmişdir ki, SbCl_3 duzunun limon turşusunda həll edilməsi elektrokimyəvi çökmə üçün ən optimal elektrolit mühitini təmin edir. Gərginliyin artması çökmə sürətini artırırsa da, yüksək gərginliklərdə (9V) hidrogenin ayrılması təbəqənin morfoloji keyfiyyətini pisləşdirir. Elektrokimyəvi yolla alınan stibium-sulfid təbəqələrinin qalınlığının artması sistemin elektrik müqavimətini eksponensial şəkildə artırır və bu, prosesin avtomatik dayanma xüsusiyyətini nümayiş etdirir. Gələcək tədqiqatlarda hər iki komponentin (Sb və S) eyni məhluldan birgə çökmə şəraitinin (pH və temperatur asılılığı) öyrənilməsi məqsəduyğun hesab edilir.

ƏDƏBİYYATLAR

- Hegde, G. S., & Prabhu, A. N. (2022). A Review on Doped/Composite Bismuth Chalcogenide Compounds for Thermoelectric Device Applications: Various Synthesis Techniques and Challenges: GS Hedge, AN Prabhu. Journal of Electronic Materials, 51(5), 2014-2042.
- J. Christian, (1992). "Electrochemistry of Semiconductors and Electronics", Noyes Publications.

- Quliyev, P. (2023). "Yarımkeçirici təbəqələrin elektrokimyəvi sintezi". NDU Elmi Əsərləri.
- Majidzade VA, Aliyev ASh, Qasimoglu I, Quliyev PH, Tagiyev DB (2019) Electrical properties of electrochemically grown thin Sb_2Se_3 semiconductor films. *Inorg Mater* 55:979–983. <https://doi.org/10.1134/S0020168519100108>
- Majidzade, V. A., Aliyev, A. S., Guliyev, P. H., Babayev, Y. N., Elrouby, M., & Tagiyev, D. B. (2018). Electrochemical behaviour of selenite ions in tartaric electrolytes. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, 8(3), 197-204. <https://doi.org/10.5599/jese.490>, 2020.
- Majidzade, V. A., Guliyev, P. H., Aliyev, A. S., Elrouby, M., & Tagiyev, D. B. (2017). Electrochemical characterization and electrode kinetics for antimony electrodeposition from its oxychloride solution in the presence of tartaric acid. *Journal of Molecular Structure*, 1136, 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.01.082>
- Parbatani, A., Song, E. S., Claypoole, J., & Yu, B. (2019). High performance broadband bismuth telluride tetradymite topological insulator photodiode. *Nanotechnology*, 30(16), 165201.
- Takahashi, M., Kojima, M., Sato, S., Ohnisi, N., Nishiwaki, A., Wakita, K., ... & Muramatsu, Y. (2004). Electric and thermoelectric properties of electrodeposited bismuth telluride (Bi_2Te_3) films. *Journal of Applied Physics*, 96(10), 5582-5587. doi:10.1063/1.1785834.
- Tittes, K., Bund, A., Plieth, W., Bentien, A., Paschen, S., Plötner, M., ... & Fischer, W. J. (2003). Electrochemical deposition of Bi_2Te_3 for thermoelectric microdevices. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 7(10), 714-723. doi:10.1007/s10008-003-0378-8.
- Wijngaards, D. D. L., Kong, S. H., Bartek, M., & Wolffenbuttel, R. F. (2000). Design and fabrication of on-chip integrated polySiGe and polySi Peltier devices. *Sensors and Actuators A: Physical*, 85(1-3), 316-323. doi:10.1016/S0924-4247(00)00417-9.

ABSTRACT

STUDY OF THE INFLUENCE OF SEVERAL FACTORS ON THE ELECTROCHEMICAL SYNTHESIS OF ANTIBIUM-SULFIDE SYSTEMS

Parvin Guliyev¹, Ravana Asgarli¹

¹*Nakhchivan State University, Nakhchivan, Azerbaijan*

The present study is devoted to the electrochemical deposition and synthesis of antimony sulfide (Sb_2S_3) thin films, which hold an important position in semiconductor technology. Electrolytes based on antimony(III) chloride (SbCl_3) and sodium sulfite (Na_2SO_3) were selected as the primary systems for the investigation. Using these electrolytes, the deposition behavior and separation characteristics of metallic antimony and sulfide phases were systematically investigated. Particular attention was paid to the role of citric acid as a complexing agent, the effect of the applied voltage (1.5 V and 9 V) on the deposition kinetics, and the behavior of copper (Cu) as an electrode material during the reduction process. The increase in the electrical resistance of the antimony layer formed at the cathode over time and its effect on the current intensity were scientifically substantiated. The experimental results demonstrated that, as the thickness of the antimony sulfide layer formed on the cathode increases, the electrical resistance of the system rises exponentially, resulting in a gradual decrease in the current intensity to zero over time. Although increasing the applied voltage from 1.5 V to 9 V enhances the deposition rate, the intensive hydrogen evolution observed at higher voltages adversely affects the morphological uniformity of the deposited layer and its adhesion to the electrode surface. Analysis of the anodic processes indicates that oxidation of the copper electrode and the formation of colored complexes in the solution demonstrate the critical importance of appropriate electrode-material selection in the synthesis of semiconductor thin films.

Keywords: *antimony sulfide, electrochemical deposition, semiconductor layers, band gap, electrolyte.*

РЕЗЮМЕ

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ФАКТОРОВ НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ АНТИБИЙ-СУЛФИД

Парвин Гулиев¹, Равана Асгарли¹

¹Нахчыванский государственный университет, Нахчыван, Азербайджан

Представленная исследовательская работа посвящена синтезу тонких пленок сульфида сурьмы (Sb_2S_3), занимающего важное место в технологии полупроводников, методом электрохимического осаждения. В качестве основных электролитов в исследовании были выбраны растворы на основе хлорида сурьмы(III) (SbCl_3) и сульфита натрия (Na_2SO_3). С использованием данных электролитов были исследованы закономерности осаждения металлической сурьмы и сульфидных фаз. Особое внимание уделено роли лимонной кислоты в качестве комплексообразующего агента, влиянию приложенного напряжения (1,5 и 9 В) на кинетику осаждения, а также поведению меди (Cu), используемой в качестве электродного материала, в процессе восстановления. В ходе экспериментов было научно обосновано увеличение электрического сопротивления слоя сурьмы, формирующегося на катоде, во времени и его влияние на силу тока. Установлено, что по мере увеличения толщины слоя сульфида сурьмы, формирующегося на катоде, электрическое сопротивление системы экспоненциально возрастает, что приводит к постепенному снижению силы тока до нулевого значения. Повышение напряжения с 1,5 до 9 В способствует увеличению скорости осаждения, однако интенсивное выделение водорода, наблюдаемое при высоких напряжениях, отрицательно влияет на морфологическую однородность формируемого слоя и его адгезию к поверхности электрода. Анализ анодных процессов показывает, что окисление медного электрода и образование окрашенных комплексов в растворе свидетельствуют о принципиальной важности правильного выбора электродного материала при синтезе полупроводниковых тонких пленок.

Ключевые слова: сульфид сурьмы, электрохимическое осаждение, полупроводниковые слои, ширина запрещенной зоны, электролит.